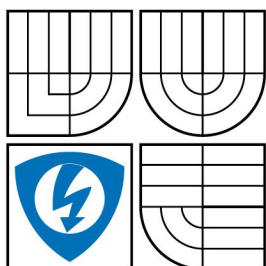


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

# **ANALÝZA DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ NAMÁHANÝCH DRÁŽKOVÝCH IZOLACÍ**

**ANALYSIS OF DIELECTRIC PROPERTIES OF STRESSED SLOT INSULATIONS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

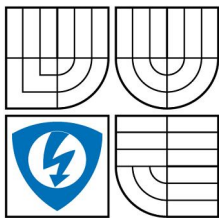
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**ZBYŠEK KREJČÍ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ**

**BRNO 2009**



VYSOKÉ UCENÍ  
TECHNICKÉ V BRNE

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

**Student:** Zbyšek Krejčí  
**Ročník:** 3

**ID:** 78143  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza dielektrických vlastností namáhaných drážkových izolací**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled materiálu používaných pro drážkové izolace v elektrotechnickém průmyslu. Prostudujte střídavé elektrické metody měření vlastností izolačních materiálu využitelných v technické praxi. Zkušební vzorky vybrané drážkové izolace podrobte tepelnému namáhání v souladu s platnou normou ČSN. Proměřte a vyhodnoťte vliv teploty na frekvenční závislosti složek komplexní permitivity vzorku sledovaného materiálu a pokuste se dielektrická spektra interpretovat z pohledu uplatnění polarizačních mechanismů.

## DOPORUCENÁ LITERATURA:

Podle pokynu vedoucího práce.

**Termín zadání:** 9.2.2009  
**Vedoucí práce:** Ing. Zdenka Rozsivalová

**Termín odevzdání:** 3.6.2009

**prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNENÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## ABSTRAKT:

Práce pojednává o experimentálním prošetření dielektrických vlastností tepelně namáhané drážkové izolace Isonom NKN. Především jsou zkoumány složky komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu a teplotě v průběhu tepelného namáhání.

## ABSTRACT:

This labor deals with experimental verification of the dielectric properties thermally aged slot insulation of Isonom NKN. Above components of the complex permittivity are examined in dependence on frequency and temperature during the thermal aging.

## KLÍČOVÁ SLOVA:

Drážková izolace, Isonom NKN, Kapton, komplexní permitivita, Nomex, teplotní stárnutí.

## KEYWORDS:

Slot insulation, Isonom NKN, Kapton, complex permittivity, Nomex, thermal aging.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE:

KREJČÍ, Z. *Analýza dielektrických vlastností namáhaných drážkových izolací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 33 s.  
Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

## PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma ANALÝZA DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ NAMÁHANÝCH DRÁŽKOVÝCH IZOLACÍ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce, s použitím literárních pramenů a publikací, které jsem všechny uvedl v seznamu literatury.

V Brně dne 1. června 2009

.....  
Zbyšek Krejčí

## PODĚKOVÁNÍ:

V úvodu bych rád poděkoval své vedoucí bakalářské práce Ing. Zdence Rozsivalové a také Ing. Martinu Frkovi, Ph.D za metodické vedení a cenné rady, které mi poskytli během mé práce.

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD .....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>             | <b>10</b> |
| 2.1 VLASTNOSTI DIELEKTRIK .....            | 10        |
| 2.1.1 Charakteristika dielektrik .....     | 10        |
| 2.1.2 Dielektrická polarizace .....        | 11        |
| 2.1.3 Elektrická vodivost .....            | 13        |
| 2.1.4 Dielektrické ztráty .....            | 13        |
| 2.1.5 Komplexní permitivita .....          | 14        |
| 2.2 STÁRNUTÍ DIELEKTRIK .....              | 18        |
| 2.2.1 Tepelné stárnutí dielektrik .....    | 18        |
| 2.2.2 Pravidla stárnutí .....              | 19        |
| 2.2.3 Životnost dielektrik .....           | 20        |
| 2.3 SLOŽENÉ MATERIÁLY .....                | 21        |
| 2.3.1 Vlastnosti složených materiálů ..... | 21        |
| <b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>         | <b>22</b> |
| 3.1 ZKUŠEBNÍ VZOREK .....                  | 22        |
| 3.1.1 Nomex .....                          | 23        |
| 3.1.2 Polyamidová fólie Kapton .....       | 23        |
| 3.2 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ .....                | 24        |
| 3.2.1 Korekce .....                        | 24        |
| 3.2.2 Tříelektrodový měřicí systém .....   | 24        |
| 3.3 POSTUP MĚŘENÍ .....                    | 25        |
| 3.4 VÝSLEDKY EXPERIMENTU .....             | 26        |
| 3.5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....          | 30        |
| <b>4 ZÁVĚR .....</b>                       | <b>31</b> |
| <b>5 POUŽITÁ LITERATURA .....</b>          | <b>32</b> |

## Seznam obrázků

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Obr. 1  | Vztah mezi dielektriky a izolanty .....  | 10 |
| Obr. 2  | Druhy polarizačních mechanismů.....  | 11 |
| Obr. 3  | Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity ([8]).....   | 15 |
| Obr. 4  | Průběh složek $\varepsilon'$ a $\varepsilon''$ komplexní permitivity kmitočtové závislosti na kruhovém kmitočtu $\omega$ ([8]) .....   | 16 |
| Obr. 5  | Coleho-Coleho diagram klasického Debyeho průběhu $\varepsilon^* = F(\omega)$ při $\vartheta =$ konstanta ([5]).....  | 17 |
| Obr. 6  | Coleho-Coleho kruhový diagram s distribucí relaxačních časů ([5]) .....  | 18 |
| Obr. 7  | LCR metr Agilent E4980A ([2]).....   | 24 |
| Obr. 8  | Příklad zapojení tříelektrodového měřicího systému ([1]).....  | 25 |
| Obr. 9  | Řez tříelektrodovým měřicím systémem ([1]).....  | 25 |
| Obr. 10 | Závislost $\varepsilon' = F(f)$ , $\varepsilon'' = F(f)$ a Coleho-Coleho kruhový diagram při teplotě 40 °C a době stárnutí 1600 h (teplota stárnutí 220 °C) .....            | 27 |
| Obr. 11 | Závislost $\varepsilon' = F(f)$ , $\varepsilon'' = F(f)$ a Coleho-Coleho kruhový diagram při teplotě 20 °C (teplota stárnutí 220 °C) .....                                   | 28 |
| Obr. 12 | Závislost $\varepsilon' = F(f)$ a $\varepsilon'' = F(f)$ a Coleho-Coleho kruhový diagram při době stárnutí 1000 h a teplotě stárnutí 220 °C s parametrem teploty měření..... | 29 |



## ÚVOD

Elektromagnetické pole působí na vše kolem nás. V technické praxi se snažíme využít především těch materiálů, u kterých působení elektromagnetického pole vyvolá výraznou odezvu. V současné době známe materiály, které se blíží svými vlastnostmi k izolantům a mají specifické chování v elektrickém poli nebo které jsou vodivé a reagují dominantně na magnetické pole.

Pro jednu skupinu materiálu se vžil název dielektrické materiály. Jejich vnitřní struktura je schopna reagovat na vnější elektrické pole změnou uspořádání vázaných nábojů. Vykazují schopnost polarizace. Polarizace jejich vnitřní struktury vyžaduje příjem vnější energie, která je odnímána budicímu elektromagnetickému poli. V teoretickém případě ztrátových dielektrik můžeme uvažovat, že tato energie, nutná k polarizaci, se nepřemění na jinou formu (například na teplo nebo na mechanickou energii) a případně bude akumulována v celém objemu materiálu. Tyto materiály se používají k akumulaci elektrické energie tak, jak známe v případě kapacity nebo indukčnosti.

Úkolem bakalářské práce je experimentálně prošetřit základní dielektrické vlastnosti vzorků drážkové izolace v průběhu tepelného stárnutí. Sledovány jsou především obě složky komplexní permitivity v závislosti na teplotě a kmitočtu. Teplotní oblast je volena v rozmezí 20 – 50 °C a kmitočtová oblast je sledována od 20 Hz do řádově  $10^6$  Hz. Pro experimentální proces byla zvolena drážková izolace Isonom NKN.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Vlastnosti dielektrik

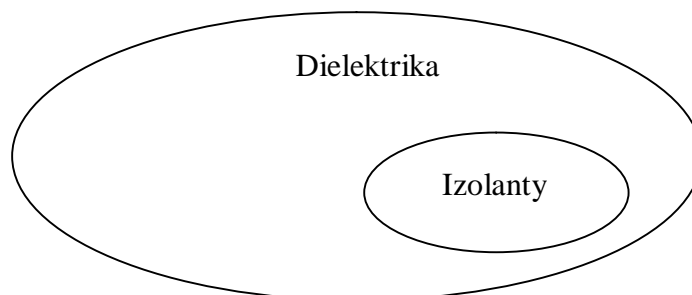
#### 2.1.1 Charakteristika dielektrik

Za ideální dielektrikum se považuje látka, která je složená výhradně z nábojů vzájemně vázaných elektrostatickými silami a neobsahující volně pohyblivé elektrické náboje. Elektroizolační látky, běžně používané v elektrotechnické praxi, však obsahují malá množství volných nábojů (elektronů, kladných a záporných iontů), které se působením vnějšího elektrického pole mohou v látce pohybovat. Reálné dielektrikum je tedy v nepatrné míře vodivé. Proto i v slabém elektrickém poli jím protéká malý, nikoliv však zanedbatelný, proud.

Dielektrika jsou složena z atomů, molekul a iontů. Elektrické vlastnosti dielektrik závisí na chemickém složení, struktuře, stavu a skupenství. Podle skupenství lze dielektrika dělit na plynná, kapalná a tuhá.

Základními fyzikálními veličinami, které charakterizují dielektrika, jsou:

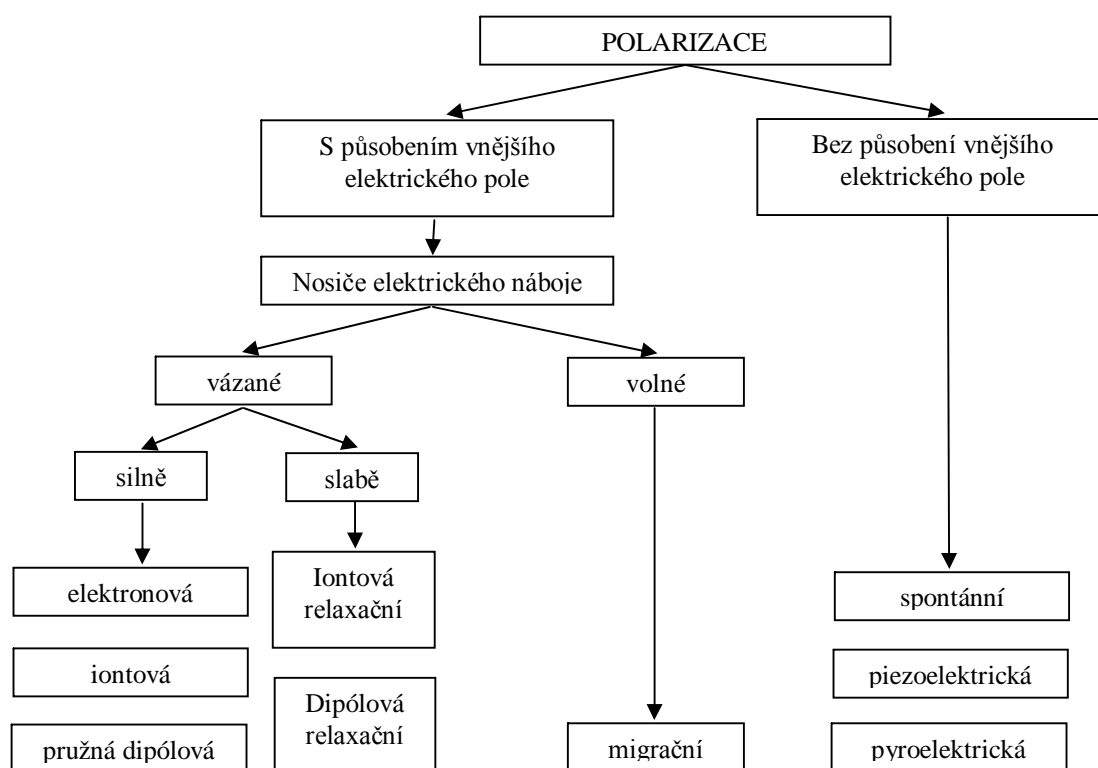
- relativní permitivita  $\varepsilon'$  (-)
- ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  (-)
- vnitřní rezistivita  $\rho_v$  ( $\Omega \text{ m}$ )
- povrchová rezistivita  $\rho_p$  ( $\Omega$ )
- elektrická pevnost  $E_p$  ( $\text{V m}^{-1}$ ).



Obr. 1 Vztah mezi dielektriky a izolanty

Každý izolant lze považovat za dielektrikum, ale ne všechna dielektrika jsou izolanty. O dielektriku se hovoří v souvislosti s polarizovatelností jeho kladných a záporných nábojů, které jsou vzájemně vázány elektrostatickými silami. Následkem své polarizovatelnosti je materiál schopen akumulovat, po přiložení elektrického pole, elektrickou energii. V ideálním dielektriku, které neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, by se elektrické pole udrželo po neomezeně dlouhou dobu.

### 2.1.2 Dielektrická polarizace



Obr. 2 Druhy polarizačních mechanismů

Polarizace představuje fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole posouvají (přemísťují) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových, na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, orientují (natáčí) se do směru pole. Za určitých podmínek jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Mírou polarizace v látce je vektor polarizace  $\vec{P}$  a relativní permitivita  $\epsilon'$ , která souvisí s polarizovatelností.

Při působení elektrického pole se často v dielektrické látce vyskytuje několik druhů polarizačních mechanismů, slabší mechanismy bývají překryty silnějšími. Zpravidla se rozdělují na jevy s rychlým průběhem (pružné polarizace) a jevy s pomalým průběhem (relaxační polarizace). [4]

### **Rozdělení polarizačních mechanismů**

**Polarizace rychlé** – jsou jevy s rychlým průběhem. Spočívají v posuvu pružně vázaných nábojů v částicích dielektrika z jejich rovnovážných poloh, přičemž se posouvají stejná množství kladných a záporných nábojů v opačných směrech. Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání, proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Rychlé polarizace jsou tepelně nezávislé v celém rozsahu kmitočtů používaných v elektrotechnice.

- *Polarizace elektronová* – vyskytuje se u všech dielektrik, beze ztrát, nezávisí na teplotě.
- *Polarizace iontová* – vyskytuje se jen u iontových krystalů, beze ztrát a je závislá na teplotě.

**Polarizace pomalé** – jsou jevy s pomalým průběhem. Závisí na teplotě i na tepelném pohybu částic, jehož energie je příčinou přemístění částic z jejich rovnovážných poloh, přičemž elektrické pole toto přemístění jen orientuje do svého směru. Proto se často označují jako polarizace tepelné nebo teplotně závislé. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, které způsobují jeho ohřev.

- *Polarizace dipólová* – vyskytuje se u polárních látek.
- *Polarizace iontová-relaxační* – vyskytuje se v iontových látkách.

### **Polarizace zvláštní**

- *Polarizace mezivrstevová* – u látek s makroskopickými nehomogenitami (laminát, pórovité a pěnové látky). Nejpomalejší polarizační mechanismus, který je provázen ztrátami a je závislý na teplotě a na kmitočtu.
- *Polarizace samovolná* – vyskytuje se u látek s doménovou strukturou, je ztrátová, závislá na kmitočtu, intenzitě elektrického pole a je silně závislá na teplotě.
- *Polarizace trvalá* – u některých látek polárních s malou elektrickou vodivostí.
- *Polarizace rezonanční* – vyskytuje se u všech dielektrik, projevuje se ve viditelném spektru kmitočtů.

### 2.1.3 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost popisuje schopnost látky dobře vést elektrický proud. Čím větší je vodivost, tím větší elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí. Z pohledu ideálního dielektrika se jedná o nežádoucí vlastnost. Elektrickou vodivost lze rozdělit podle druhu nosičů náboje na iontovou, elektronovou a elektroforetickou. Dále lze elektrickou vodivost dielektrických látek rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou. Vnitřní konduktivita je dána vztahem

$$\gamma_v = nq\mu, \quad (1)$$

kde  $n$  je koncentrace nosičů elektrického náboje,  $q$  je náboj nosiče elektrického náboje a  $\mu$  je driftová pohyblivost.

### Průraz dielektrik

Uvnitř dielektrika se vytvoří vodivé spojení, kterým může procházet elektrický proud. Působením silného elektrického pole může dojít k průrazu dielektrika. Po dráze elektrického proudu se díky velké elektrické síle vytrhují elektrony z atomů nebo molekul. Může dojít k trvalému nebo k dočasnému poškození dielektrika.

Velikost maximálního elektrického pole, při němž ještě nedojde k průrazu, se nazývá dielektrická pevnost a závisí na velikosti ionizační práce, potřebné k ionizaci (uvolnění elektronu z atomu). Možnost průrazu charakterizuje průrazné napětí, které udává nejmenší velikost napětí, které způsobí průraz při dané tloušťce dielektrika.

U tuhých izolantů lze rozeznat dva typy průrazů:

- čistě elektrický průraz
- tepelný průraz.

### 2.1.4 Dielektrické ztráty

Technický izolant oproti ideálnímu má nenulovou elektrickou vodivost, obsahuje nečistoty, příměsi a má určitou vlhkost. Dochází tak k nestacionárním přesunům uvnitř dielektrika. To vede ke ztrátám energie v dielektriku, které představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku. Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého elektrického pole a jsou provázeny zahříváním dielektrika.

V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem. Tyto ztráty se navzájem sčítají. Z fyzikální podstaty se v dielektriku rozlišují ztráty vodivostní, polarizační a ionizační.

#### **Veličiny vyjadřující dielektrické ztráty:**

- ztrátový úhel  $\delta$  ( $^{\circ}$ )
- ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  (-)
- ztrátové číslo  $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$  (-)
- měrné dielektrické ztráty (velikost ztrátového výkonu  $P_z$  vztažené na jednotku objemu).

Z těchto veličin je nejdůležitějším měřítkem ztrát ztrátový činitel. Hlavními faktory, ovlivňujícími ztrátový činitel, jsou teplota a kmitočet. Ztrátový činitel lze získat řešením ekvivalentního náhradního zapojení bezztrátového (ideálního) kondenzátoru a odporu, které v dielektriku nahrazuje. [4]

#### **2.1.5 Komplexní permitivita**

Působí-li na dielektrikum časově proměnné elektrické pole, jehož intenzita má časový průběh

$$\vec{E}(t) = \vec{E} \cos \omega t, \quad (2)$$

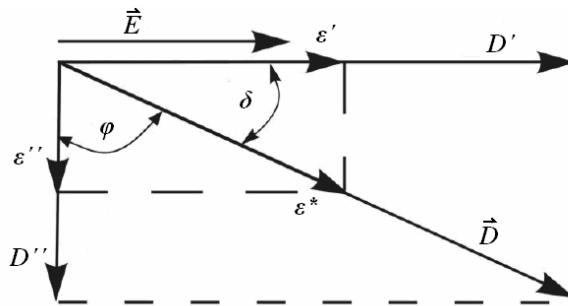
kde  $\vec{E}$  je amplituda intenzity elektrického pole a  $\omega = 2\pi f$  kruhový kmitočet, projeví se dynamické vlastnosti dielektrika.

Elektrická indukce  $\vec{D}(t)$  je rovněž periodickou funkcí času se stejným kmitočtem.

Závislost mezi  $\vec{D}$  a  $\vec{E}$  vyjadřuje rovnice

$$\vec{D} = \varepsilon(\omega) \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (3)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ) a  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon^*$  je komplexní permitivita.



Obr. 3 Vektorový diagram elektrické indukce, intenzity elektrického pole a komplexní permitivity ([8])

Z diagramu podle Obr. 3 vyplývají tyto vztahy

$$\varepsilon' = \varepsilon^* \cos \delta, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon^* \sin \delta, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (6)$$

kde úhel  $\delta$  se nazývá ztrátovým úhlem a veličina  $\operatorname{tg} \delta$  ztrátovým činitelem.

Následkem dielektrické polarizace se vektor elektrické indukce  $\vec{D}(t)$  vždy opoždí za vektorem intenzity  $\vec{E}(t)$ . Proto není  $\vec{D}(t)$  ve fázi s  $\vec{E}(t)$ , nýbrž mezi amplitudami  $\vec{D}(t)$  a  $\vec{E}(t)$  je ztrátový úhel  $\delta$ .

Permitivita dielektrika je komplexní veličinou, která se značí  $\varepsilon^*$ . Skládá se ze dvou složek  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$ , kde  $\varepsilon'(\omega)$  je reálná složka, která představuje míru kapacitního charakteru dielektrika. Je funkcí kmitočtu elektrického pole a vyjadřuje chování technického dielektrika ve střídavém elektrickém poli.

Komplexní permitivita je vyjádřena vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''. \quad (7)$$

Pro závislost na kmitočtu odvodil Debye pro komplexní permitivitu

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (8)$$

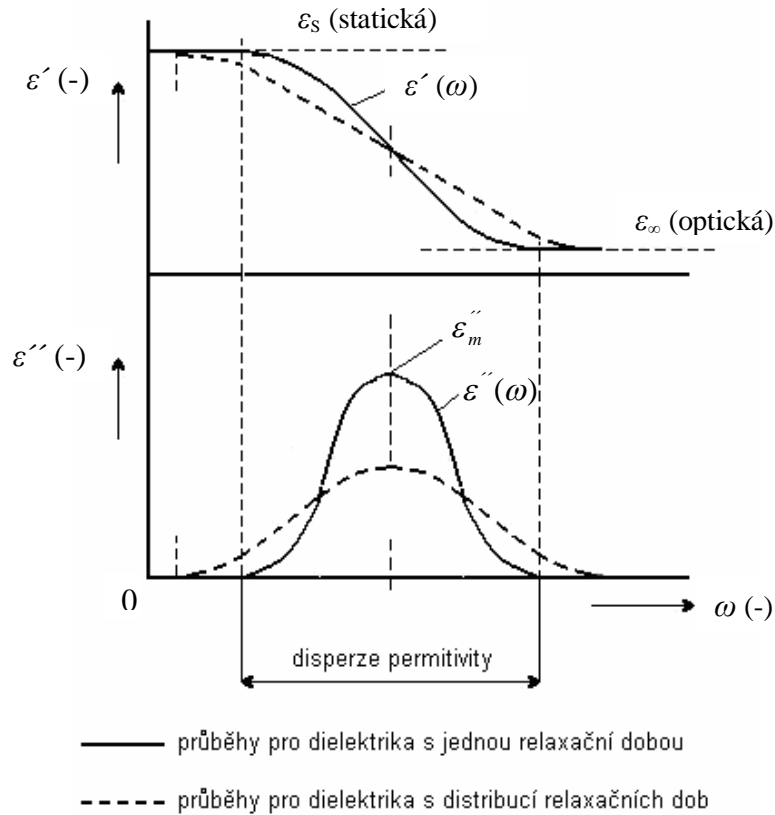
kde  $\varepsilon_s$  je statická relativní permitivita ( $f = 0$ ),  $\varepsilon_\infty$  je optická relativní permitivita ( $f \rightarrow \infty$ ),  $\tau$  je relaxační doba ( $\tau$  je závislá na teplotě).

Pro složky komplexní permitivity  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$  platí

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (9)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (10)$$

Pro většinu dielektrik má závislost  $\varepsilon' = F(\omega)$  kvalitativní průběh znázorněný na Obr. 4, kde  $\varepsilon'$  s rostoucím kmitočtem plynule klesá z největší hodnoty  $\varepsilon_s$  (statické) na nejmenší hodnotu  $\varepsilon_\infty$  (optickou), kdežto závislost  $\varepsilon'' = F(\omega)$  prochází maximem právě v místě nejpráhřejšího poklesu  $\varepsilon'(\omega)$ , tj. v inflexním bodě funkce  $\varepsilon'(\omega)$ . Dielektrické ztráty mizí při limitních kmitočtech  $\omega \rightarrow 0$  a  $\omega \rightarrow \infty$ , kdy se kondenzátor chová jako ideální. Oblast, v níž relativní permitivita klesá s kmitočtem, se nazývá oblastí kmitočtové disperze nebo anomální disperzí a je definována jako změna permitivity dielektrika se změnou kmitočtu elektrického pole.



Obr. 4 Průběh složek  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$  komplexní permitivity kmitočtové závislosti na kruhovém kmitočtu  $\omega$  ([8])



Ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  lze vyjádřit jako poměr ztrátového čísla a relativní permitivity. Po úpravě rovnic (9) a (10) vyjde

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty + \omega^2 \tau^2}. \quad (11)$$

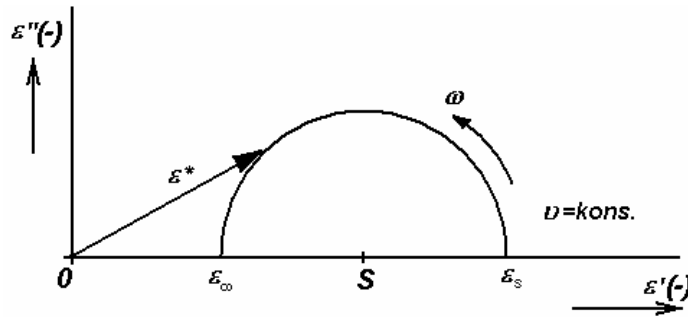
Vyloučením  $\omega \tau$  a úpravou rovnice (10), za použití rovnice (11) dostaneme

$$\varepsilon''^2 = (\varepsilon' - \varepsilon_\infty)(\varepsilon_s - \varepsilon'). \quad (12)$$

Doplněním (12) na rovnici kružnice vyjde

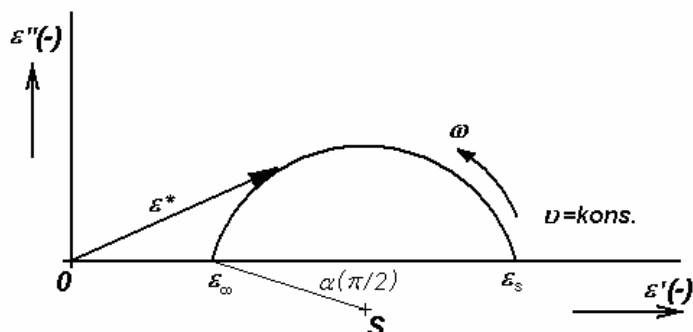
$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2. \quad (13)$$

Grafickým znázorněním rovnice (12) je Coleho-Coleho kruhový diagram. Hodnoty  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$  vynesené v komplexní rovině, ve tvaru  $\varepsilon^* = F(\varepsilon')$  při konstantní teplotě, opisují kruhový oblouk, který protíná reálnou osu  $\varepsilon'$  v bodech  $\varepsilon_s$  a  $\varepsilon_\infty$ . Tento oblouk je geometrickým místem koncových bodů vektorů  $\varepsilon^*$  při změně kmitočtu a vyjadřuje kmitočtovou závislost  $\varepsilon^*$  při konstantní teplotě  $\vartheta$ .



Obr. 5 Coleho-Coleho diagram klasického Debyeho průběhu  $\varepsilon^* = F(\omega)$  při  $\vartheta = \text{konstanta}$  ([5])

Pro distribuované relaxační časy lze také sestavit Coleho-Coleho kruhový diagram. Takový diagram má posunutý střed pod vodorovnou osu. Posunutí osy záleží na činiteli  $\alpha$ , vyjadřujícím rozložení relaxačních časů. Coleho-Coleho kruhový diagram s distribucí relaxačních časů je znázorněn na Obr. 6.



Obr. 6 Coleho-Coleho kruhový diagram s distribucí relaxačních časů ([5])

## 2.2 Stárnutí dielektrik

Stárnutí dielektrik se projevuje fyzikálními i chemickými změnami, k nimž dochází v závislosti na čase komplexním působením vlivů a podmínek. Je charakteristické trvalým zhoršením vlastností, jako je povrchová a vnitřní rezistivita, ztrátový činitel, relativní permitivita a elektrická pevnost. Největší vliv na tyto změny mají tepelné cykly, vzdušný kyslík, mechanické namáhání, klimatické a chemické vlivy. Doba života dielektrik charakterizuje dobu použitelnosti elektrického zařízení s ohledem na jeho spolehlivost a bezpečnost.

### 2.2.1 Tepelné stárnutí dielektrik

Teplota bývá hlavní příčinou stárnutí nízkonapěťových dielektrik. Nevratné fyzikálně chemické změny jsou způsobeny řadou chemických reakcí (polymerizace, oxidace, aj.). Rychlost těchto reakcí se projevuje i při pokojové teplotě, ale vzrůstá společně s teplotou. U řady materiálů se projevuje především pomalá oxidace vzdušným kyslíkem, rychlost této oxidace závisí na druhu izolace, přístupu kyslíku a teplotě. Oxidace způsobuje strukturální změny dielektrik, v dielektriku vznikají zplodiny, které zvyšují elektrickou vodivost a ztrátový činitel. U organických polymerů se při oxidaci trhají makromolekuly. Rychlost procesu roste se vzrůstající teplotou. Přetrháváním makromolekul, vlivem oxidace, klesá mechanická pevnost a současně se zhoršují elektrické vlastnosti. Při tepelném namáhání dochází často k poklesu podílu změkčovadel, čímž materiál tvrdne a křehne a opět se tak zhoršují jeho elektrické vlastnosti. U všech makromolekul se při zvýšené teplotě vyskytuje rozpad neboli depolymerace, a to i bez přístupu kyslíku. Kromě těchto reakcí mohou působit

i další vlivy, jako je elektrolyza. S ohledem na tepelné stárnutí byla dielektrika rozdělena do tepelných tříd a zavedeny mezní teploty pro každou třídu.

### 2.2.2 Pravidla stárnutí

Jeden z prvních pokusů o číselné vyjádření účinků tepelného stárnutí a o algebraické vyjádření závislosti stárnutí na čase provedl Montsinger [6]. Ten studoval dobu života  $t$  papírové izolace vodičů v olejových transformátorech. Měřil úbytek mechanické pevnosti papíru v závislosti na konstantní teplotě. Na základě svých výsledků pak sestavil rovnici

$$t = A \cdot e^{-NT}, \quad (14)$$

kde  $t$  je doba života izolace,  $N$  a  $A$  jsou materiálové konstanty a  $T$  je trvalá teplota stárnutí.

Montsinger zjistil, že doba života  $t$  izolace klesne při navýšení teploty o  $\Delta\vartheta = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  na polovinu a naopak při snížení teploty o  $\Delta\vartheta = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  se doba života prodlouží na  $2t$ . Toto pravidlo je označováno jako Montsingerovo pravidlo osmi stupňů.

Montsingerovo pravidlo osmi stupňů platí jen pro papír v oleji a pro úzký rozsah teplot. Podrobnější popis tepelného stárnutí izolantů z hlediska chemického procesu je důležitý pro lepší představu o teorii stárnutí. Výraz (14) totiž není podložen teoretickým rozbořem, avšak při degradaci organických látek stárnutím jde o soubor chemických procesů. Tyto reakce se musí řídit určitým teoretickým postupem, kterému podléhají i všechny ostatní chemické děje.

Protože stárnutí organických materiálů je soubor chemických reakcí, které zhoršují jejich fyzikální vlastnosti, je patrné, že rychlost chemické reakce odpovídá rychlosti stárnutí. Rychlostní konstanta  $k$  je úměrná době, za kterou v izolantu proběhly všechny procesy, způsobující jeho znehodnocení. Touto úvahou dospěl Büssing [6] k vyjádření životnostního zákona

$$t = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (15)$$

kde  $t$  je doba života izolace,  $b$  a  $B$  jsou materiálové konstanty a  $T$  je absolutní teplota.

Důležité zdroje informací o izolačním materiálu:

- *čára života* - je závislost doby života na teplotě, v níž materiál plní svou funkci, nebo teplotě, v níž je skladován

- *čáry stárnutí* - jsou grafickým znázorněním průběhu hodnot sledovaného znaku v závislosti na čase. Stálá teplota je zde parametrem.

### **2.2.3 Životnost dielektrik**

Stárnutím se zabývá norma ČSN 34 6410 „Zkoušky elektroizolačních materiálů“, která rozlišuje různé druhy stárnutí:

- stárnutí při skladování (kdy ještě daný materiál nekoná svou funkci)
- provozní stárnutí (koná svou funkci při běžných podmínkách)
- umělé stárnutí (na materiál působí vlivy napodobující provozní stárnutí)
- zrychlené stárnutí (na materiál působí přísnější vlivy než v běžném provozu).

Elektrické a mechanické vlastnosti dielektrik se mění s časem různě rychle. Tyto změny závisejí na materiálu, na jeho použití a namáhání v provozu. Aby bylo možno stárnutí posuzovat, je třeba zvolit pozorovatelný znak (nějakou fyzikální vlastnost). Změna této vlastnosti se musí v čase vlivem stárnutí výrazně projevit. Dále je potřeba určit kritérium zestárnutí (určitý stupeň znehodnocení dielektrika), kdy se už dielektrikum považuje za nepoužitelné pro konání své funkce. Toto kritérium je třeba určit s ohledem na celý systém a působící podmínky.

Měřítkem stárnutí pro dielektrika na bázi celulózy (papíru, lesklé lepenky, aj.) je úbytek mechanické pevnosti (znak, který se mění výrazně). Elektrická pevnost se v průběhu namáhání těchto látek příliš nemění, tudíž tento znak není vhodné kritérium. Kritériem může být také časový průběh  $\tan \delta$ .

Při zrychleném stárnutí se na izolant působí krátkodobými tepelnými cykly. Z výsledků stárnutí se odvodí závěry o životnosti dielektrika při dlouhodobém namáhání v provozních podmínkách. Teplota stárnutí v průběhu cyklického umělého stárnutí se volí vyšší než je mezní teplota izolantu odpovídající tepelné třídě.

K napodobení provozních podmínek se dielektrikum může namáhat elektricky, mechanicky nebo klimaticky. Z výsledků experimentu lze pak nakreslit čáry stárnutí a čáru života.

## **2.3 Složené materiály**

V oblasti elektrotechniky se stále častěji používají nové materiály, které jsou vytvořeny ze dvou či více materiálů různého chemického složení, jejichž geometrické útvary jsou spojeny v celém objemu materiálu. Takové materiály jsou označovány jako složené, resp. směsné.

Kompozity jsou složené materiály představující složenou soustavu a soustavu tvořenou makroskopickými útvary dvou či více materiálových složek. Složeným materiálem lze nazvat soustavu, která vyhovuje těmto kritériím [5]:

- složená soustava musí být tvořena člověkem
- soustavu tvoří spojení dvou či více materiálů rozdílného chemického složení
- geometrické útvary jednotlivých složek jsou v soustavě spojeny v celém, příp. téměř celém objemu
- složená soustava musí mít vlastnosti odlišné od vlastností složek.

### **2.3.1 Vlastnosti složených materiálů**

Složené materiály jsou tříděny podle několika odlišných aspektů, a to:

- uspořádání jednotlivých složek v soustavě
- geometrický tvar částic
- směrovost vlastní soustavy
- mechanismus zpevnění soustavy.

Rozdělení složených materiálů podle geometrického tvaru:

- vrstevnaté složené materiály
- složené materiály s vláknitými plnivy
- složené materiály plněné částicemi.

Složené materiály se také dělí na materiály s isotropními a anizotropními vlastnostmi. [5]

Při návrhu i použití kompozitů je často žádoucí znát nejen materiálové vlastnosti soustavy, nýbrž i vztah těchto vlastností k příslušným vlastnostem složek. To řeší teorie složených (směsných) soustav, jejímž hlavním úkolem je vyhledání přiměřeného směsného vztahu. [5]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Zkušební vzorek

Předmětem experimentu byl materiál Isonom NKN 2039 firmy ISOVOLTA Elektroisolierstaffe. Tento materiál se řadí mezi kombinované flexibilní izolační materiály.

**Složení** – Isonom NKN se skládá z polyamidového filmu Kapton krytého z obou stran nehlazeným Nomex papírem.

**Vlastnosti** – Isonom NKN je kombinovaný flexibilní materiál tepelné třídy 180 (H) s dobrými mechanickými vlastnostmi (vysoká pevnost v tahu, odolnost proti přetrhnutí) a elektrickými vlastnostmi. Typ 2039 je flexibilní, má nehlazený povrch, a proto je více nasákavý než obdobné typy 0886 a 0887, které mají hladký povrch.

**Použití** – používá se především jako drážková a fázová izolace v tepelně přetěžovaných motorech. Může se také použít jako mezivrstevová izolace v transformátorech a dalších elektrických přístrojích a spotřebičích.

**Skladování** – může být skladován neomezeně dlouho při normálních podmínkách (20 °C a 50 % relativní vlhkosti).

**Technická data** – jsou uvedena v (Tabulka 1).

Tabulka 1 Technické vlastnosti Isonomu NKN typů 0886, 0887 a 2039

| Typ                            |                   | Isonom<br>NKN 0886 | Isonom<br>NKN 0887 | Isonom<br>NKN 2039 |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Vlastnosti                     | Jednotka          | Hodnota            | Hodnota            | Hodnota            |
| jmenovitá tloušťka             | mm                | 0,20               | 0,30               | 0,30               |
| tolerance                      | mm                | ±0,015             | ±0,03              | ±0,03              |
| plošná hmotnost                | g m <sup>-2</sup> | 191                | 299                | 147                |
| průrazné napětí                | kV                | 7                  | 9                  | 5                  |
| průrazné napětí po skládání    | kV                | 7                  | 8                  | 5                  |
| tažná síla podélná/příčná      | N/10mm            | 160/120            | 300/180            | 35/35              |
| prodloužení (podélné a příčné) | %                 | ≥3                 |                    |                    |
| tepelná třída                  |                   | 180 (H)            |                    |                    |

### 3.1.1 Nomex

Nomex je stále více používaným materiálem. Je to syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu. Aramidové částičky jsou zpracovány běžnými papírenskými technologiemi do podoby papíru, který je dále zpevňován kalandrováním (válcováním mezi válci s vysoce lesklým povrchem) při vysokých teplotách [7].

Je to teplotně odolný materiál, který se používá především jako ochrana před nebezpečnými účinky vysoké teploty. V elektrotechnice je využíván pro své dobré elektrické, mechanické a chemické vlastnosti. Používá se pro drážkové a fázové izolace a tam, kde je potřeba splnit požadavky tepelné třídy 180 (H). Nomex není elastický a při ohýbání ztrácí mechanickou pevnost.

### 3.1.2 Polyamidová fólie Kapton

Vyznačuje se jedinečnou kombinací vlastností. Kapton má vysokou pevnost v tahu, dobrou elasticitu a také vysokou odolnost vůči kyselinám a alkáliím. Netaví se a splňuje nejvyšší třídu samozhášitelnosti. Je odolný proti ultrafialovému záření a záření typu alfa, beta a gamma. Působením vlhkosti se zhoršují jeho mechanické vlastnosti.

Mezi nejdůležitější vlastnosti patří vysoká tepelná vodivost, antistaticita a velká tvarová přizpůsobivost. Odolává i velmi nízkým teplotám. Své elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti si zachovává v širokém rozsahu teplot, a to od  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Využívá se především v aplikacích, kde jsou jiné organické polymery nepoužitelné. Jeho vlastnosti je vidět v (Tabulka 2).

Tabulka 2 Vlastnosti polyamidu Kapton

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| elektrická pevnost                  | cca $20 \cdot 10^6\text{ V m}^{-1}$                                |
| ztrátový činitel                    | 0,0025   |
| relativní permitivita               | 3,5  |
| vnitřní rezistivita                 | $10^{15}\text{ }\Omega\text{ m}$                                   |
| teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) | mezi $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| pevnost v tahu                      | $172 \cdot 10^6\text{ Pa}$   |

### 3.2 Měřicí pracoviště

Pro měření byl použit přesný LCR metr firmy Agilent E4980A (Obr. 7) ve spojení s tříelektrodovým systémem firmy Agilent 16451B. Tento RLC-metr s kmitočtovým rozsahem 20 Hz až 2 MHz pracuje na principu mostové metody s automatickým vyvažováním. Používá sběrnici USB pro komunikaci s počítačem a obslužného programu. Výstupem naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele jsou ukládány přímo do tabulkového procesoru Microsoft Excel.



Obr. 7 LCR metr Agilent E4980A ([2])

#### 3.2.1 Korekce

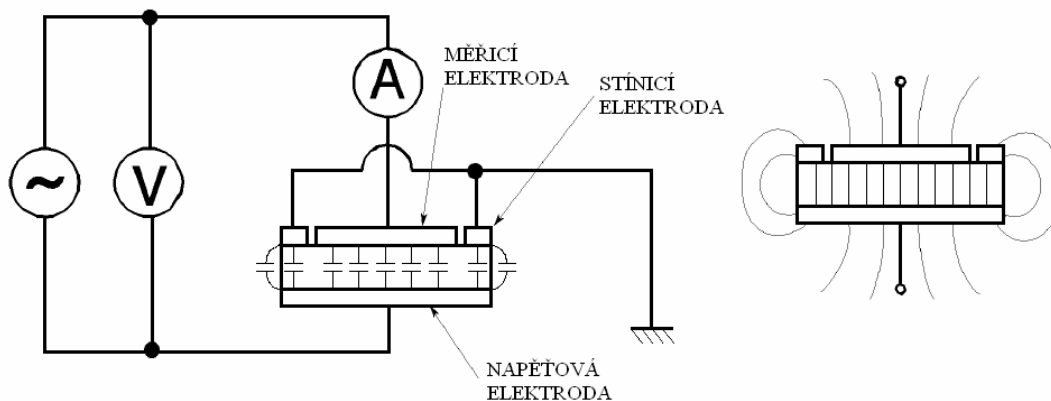
Před každým měřením bylo potřeba provést korekce, které zabraňují vzniku chyb během měření. Konkrétně se jedná o chyby způsobené délkou kabelu, vlastní impedancí a rozptylovou admitancí mezi vodiči. Měřicí přístroj je vybaven korekcemi OPEN, SHORT a LOAD, které tyto chyby odstraňují. Korekce OPEN (naprázdno) pomáhá odstranit chybu, kterou způsobuje rozptylová admitance  $Y_0$ . Korekce SHORT zase eliminují chybu, která je zapříčiněna délkou kabelu, tudíž ztrátovou impedancí  $Z_S$ . Korekce LOAD nebyla při měření použita, kompenzuje však rozdíl naměřené hodnoty a známé standardní hodnoty při přednastavených podmínkách měření. [3]

#### 3.2.2 Tříelektrodový měřicí systém

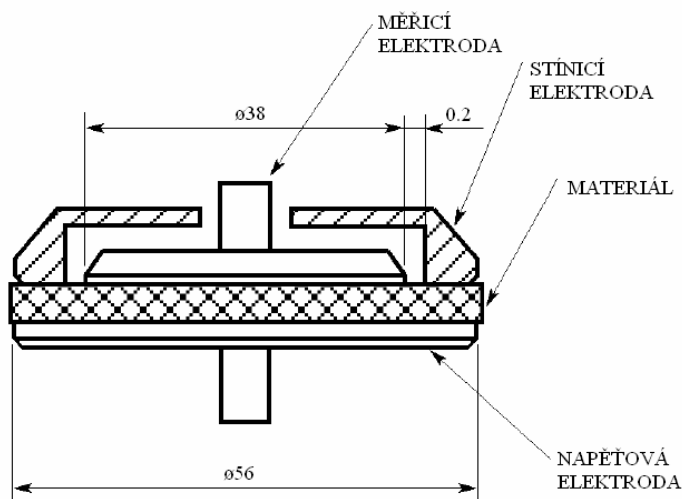
Při měření byl použit tříelektrodový systém od firmy Agilent 16451B. Systém se používá u materiálů, jejichž hodnoty vnitřních odporů jsou řádově stejné jako hodnoty povrchových odporů. Proud procházející materiálem je podstatně menší než proud, který prochází po



povrchu materiálu, a proto jím může být ovlivněn. Snahou je eliminovat povrchový proud použitím speciální ochranné elektrody, která je svedena na nulový potenciál. Povrchový proud pak už neovlivňuje měření proudu procházejícího přes materiál. Třielektrodový systém je zobrazen na Obr. 8.



Obr. 8 Příklad zapojení třielektrodového měřicího systému ([1])



Obr. 9 Řez třielektrodovým měřicím systémem ([1])

### 3.3 Postup měření

Pro daný experiment byly použity tepelně namáhané zkušební vzorky drážkové izolace Isonom NKN. Vzorky byly nastříhány na rozměr 80 x 80 mm. Tloušťka vzorků je v průměru 0,30 mm.

Mezi jednotlivými měřeními byly vzorky ponechány v exsikátoru s nulovou relativní vlhkostí. Ta byla dosažena pomocí molekulárního síta, tvořeného zeolity. Zeolity jsou krystalické hydratované alumosilikáty alkalických kovů a kovů alkalických zemin.

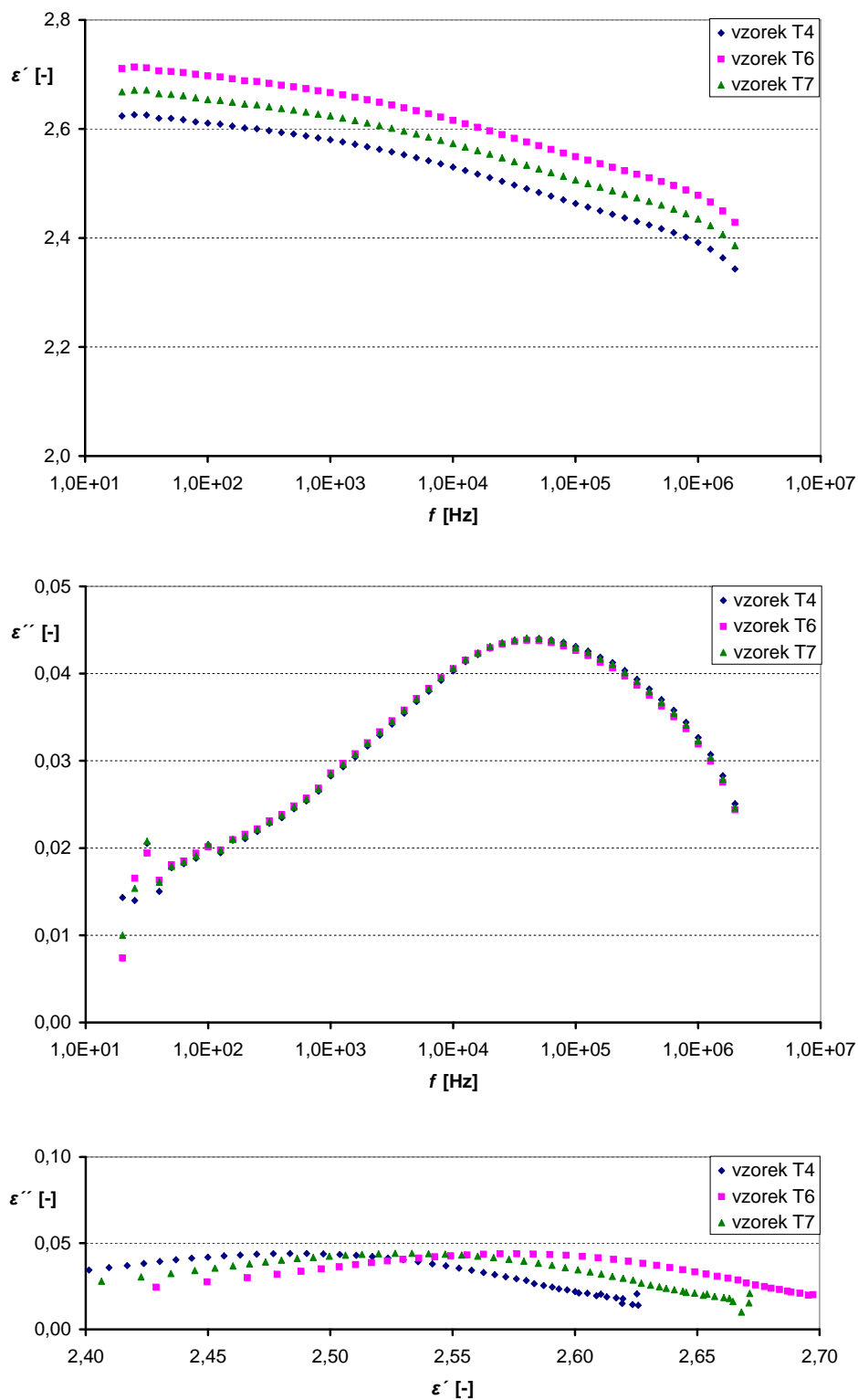
Norma ČSN 34 6410 doporučuje tepelné namáhání při teplotě okolo 200 °C. S ohledem na zrychlení stárnutí materiálu, byla teplota stárnutí zvolena na 220 °C. Vzorky s označením T1, T2, T3, T4, T5, T6 a T7 byly podrobeny tepelnému namáhání v horkovzdušné komoře Stericell.

Pro měření byl použit přístroj Agilent E4980A, tříelektrodový měřicí systém Agilent 16451B a klimatická komora Climacell. Na přístroji Agilent E4980A bylo potřeba před samotným měřením provést korekce nutné k měření. Korekce jsou popsány v kapitole 3.2.1. Měření probíhalo při relativní vlhkosti 10 % (nižší vlhkost neumožňuje použít klimatická komora nastavit) a při teplotách 20 °C, 30 °C, 40 °C a 50 °C (měření při vyšší teplotě nebylo realizováno s ohledem na parametry elektrodového systému). Teplota a vlhkost byla nastavována na ovládacím panelu klimatické komory. Byly snímány kmitočtové závislosti kapacity a ztrátového činitele. Následně byly stanoveny kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele, tedy složek komplexní permitivity. Měření na každém vzorku bylo opakováno čtyřikrát pro každou teplotu. Poté byly výsledky statisticky vyhodnoceny.

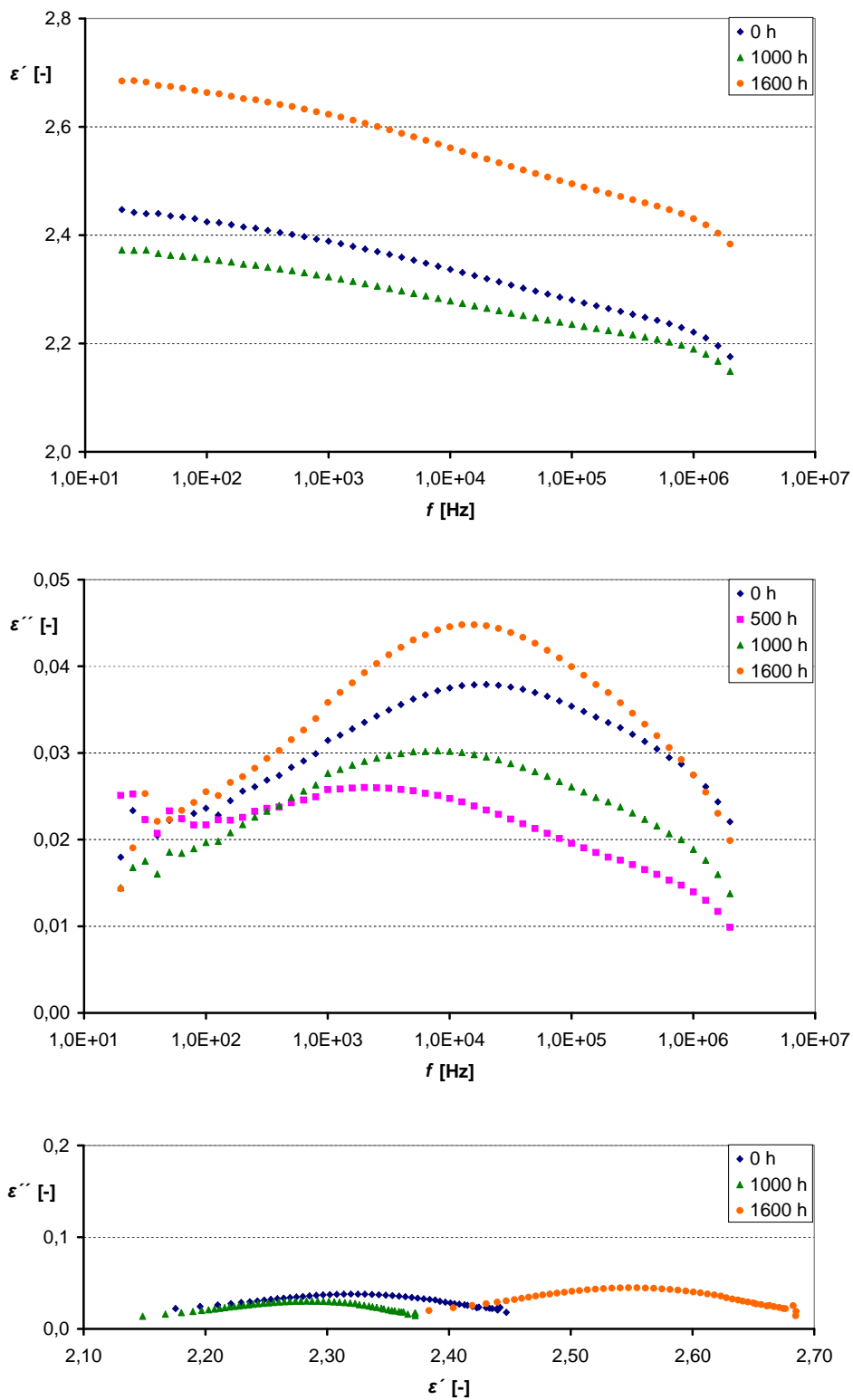
### **3.4 Výsledky experimentu**

Všechna data experimentálně získaná, byla zpracována tabelárně a graficky. Údaje získané měřeními jsou shrnuty v tabulkách a grafech, které jsou všechny uvedeny na příloženém paměťovém médiu. V prvním sloupci je nastavovaný kmitočet, v dalších paralelní kapacita a ztrátový činitel, které se opakují podle počtu měření. V následujících sloupcích jsou pak vypočítané hodnoty relativní permitivity  $\varepsilon'$  a ztrátového čísla  $\varepsilon''$ . Tabulkové hodnoty byly zpracovány graficky do závislostí  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$  s parametrem teploty měření nebo doby namáhání.

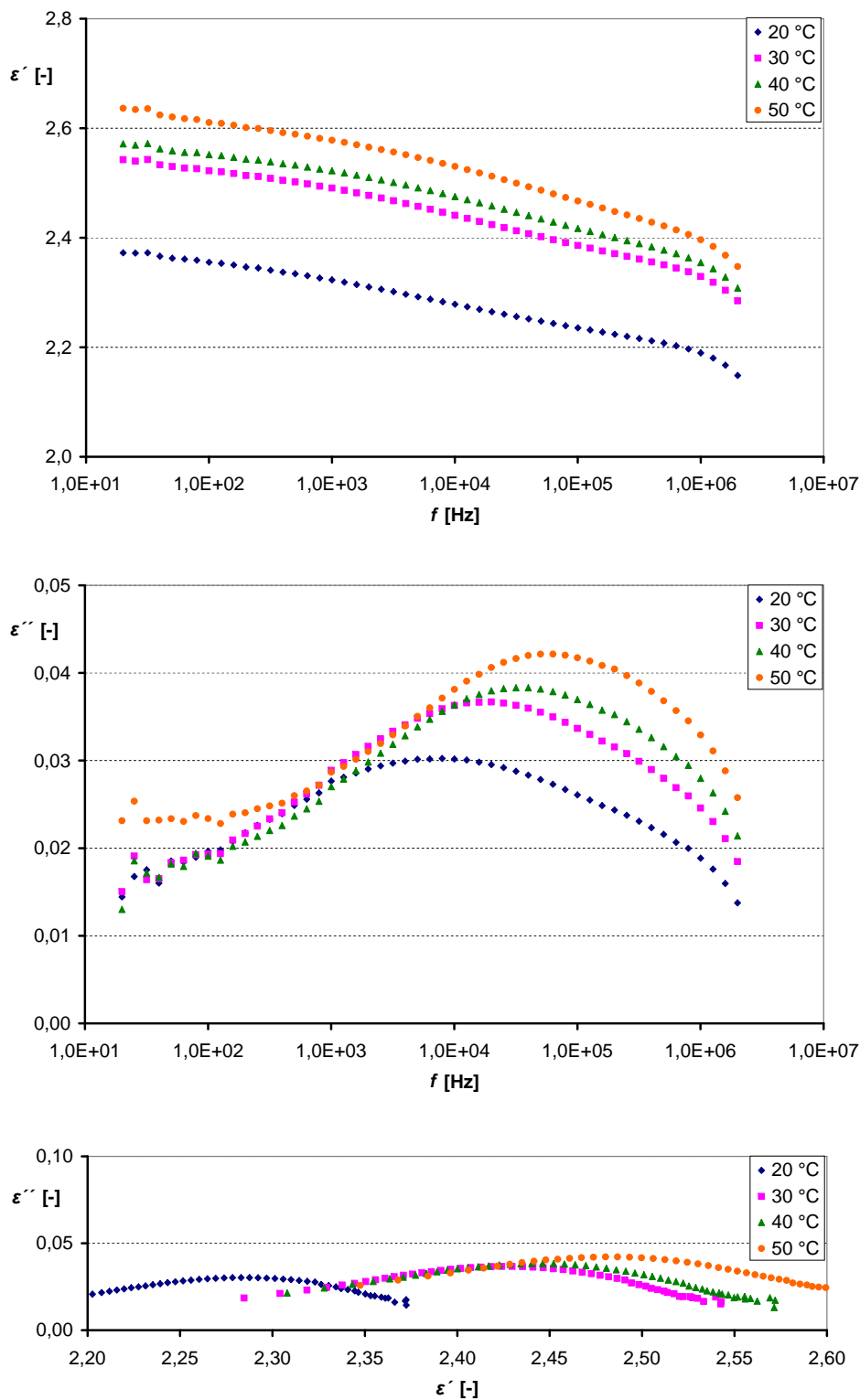
Grafické znázornění výše uvedených závislostí vzorků T4, T6 a T7 po době stárnutí 1600 h (teplotou 220 °C), měřeno při teplotě 40 °C je na (Obr. 10). Následující (Obr. 11) znázorňuje postupné stárnutí vzorků při teplotě měření 20 °C. Závislost  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a Coleho-Coleho kruhový diagram při době stárnutí 1000 h (teplota stárnutí 220 °C), parametrem teploty měření je na (Obr. 12). Ostatní grafická znázornění závislostí jsou přiložena na paměťovém médiu.



Obr. 10 Závislost  $\varepsilon' = F(f)$ ,  $\varepsilon'' = F(f)$  a Coleho-Coleho kruhový diagram při teplotě 40 °C a době stárnutí 1600 h (teplota stárnutí 220 °C)



Obr. 11 Závislost  $\epsilon' = F(f)$ ,  $\epsilon'' = F(f)$  a Coleho-Coleho kruhový diagram při teplotě 20 °C (teplota stárnutí 220 °C)



Obr. 12 Závislost  $\varepsilon' = F(f)$  a  $\varepsilon'' = F(f)$  a Coleho-Coleho kruhový diagram při době stárnutí 1000 h a teplotě stárnutí 220 °C s parametrem teploty měření

### 3.5 Vyhodnocení experimentu

Zpracované grafické průběhy ukazují kmitočtové závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla a vztah mezi oběma složkami komplexní permitivity (Coleho-Coleho diagram) a jejich změny při měření na stejném typu vzorků (Obr. 10). Relativní permitivita, podle teoretických předpokladů s kmitočtem klesá a hodnota ztrátového čísla postupně vzrůstá až do svého maxima a následně dochází k jejímu snižování. Křivky odpovídající jednotlivým vzorkům vykazují minimální odchylky, což může být částečně způsobeno i nepřesností přístrojů. S ohledem na tuto shodu výsledků měření a výpočtů bylo přikročeno, při dalším vyhodnocení, k použití středních hodnot, jak relativní permitivity, tak ztrátového čísla.

Pro přehlednost mají grafy shodné měřítko, aby bylo možno snadněji porovnat rozdílné hladiny stárnutí.

Z Obr. 11 je patrné, že se hodnoty relativní permitivity a ztrátového čísla u vzorků tepelně namáhaných po dobu 500 h snížily, pravděpodobně vlivem změny struktury v materiálu. Při dalším namáhání, až do doby 1600 h, měly hodnoty relativní permitivity a ztrátového čísla zvyšující se tendenci. Což vypovídá o zhoršování elektroizolačních vlastností zkoumaného materiálu. Uvedená skutečnost souvisí s vlivem oxidace, která způsobuje strukturální změny dielektrik.

Vliv teploty na sledované závislosti ukazuje Obr. 12. Vzrůstající teplota měření, má za následek zvýšení, jak reálné, tak i imaginární složky komplexní permitivity, což opět potvrzuje vliv teploty na degradaci materiálu. Je zde viditelný posun relaxačního maxima k vyšším kmitočtům.

## 4 ZÁVĚR

Nedestruktivními metodami byly experimentálně prošetřeny dielektrické vlastnosti nestárnuté a tepelně namáhané drážkové izolace Isonom NKN. Sledovanými veličinami byly kmitočtové závislosti obou složek komplexní permitivity v průběhu tepelného namáhání. Získané hodnoty jsou uvedeny v grafických závislostech na Obr. 10 až Obr. 12. Všechna naměřená a vyhodnocená data jsou uložena na paměťovém médiu.

Měřením byl prokázán pokles relativní permitivity v závislosti na vzrůstajícím kmitočtu. V průběhu dlouhodobého tepelného namáhání se hodnoty relativní permitivity a ztrátového čísla zvyšovaly. Relaxační maximum se vzrůstající teplotou měření, v souladu s teoretickými předpoklady posouvalo směrem k vyšším kmitočtům. Tento posun je patrný i z Coleho-Coleho kruhových diagramů, znázorněných na Obr. 12.

Pro získání dalších poznatků o změnách vyvolaných tepelným namáháním ve sledované drážkové izolaci bude třeba provést rozsáhlejší experiment, který by potvrdil závěry této práce a ukázal trendy vlivu teploty na zkoumaný materiál při dlouhodobém namáhání.

## 5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Agilent: *16451B Operation manual* [online]. [cit. 2009-05-10]. Dostupné z WWW: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16451-90020.pdf>
- [2] Agilent: *E4980A Operation manual* [online]. [cit. 2009-05-10]. Dostupné z WWW: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4435EN.pdf>
- [3] Janošek, M. *Dielektrické vlastnosti nestárnuté a teplotně stárnuté drážkové izolace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsíválová.
- [4] Jiráček, J.: Autrata, R. Liedermann, K., a spol. *Materiály a technická dokumentace: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně*.
- [5] Kazelle, J.: a spol. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně*.
- [6] Liedermann, K.: *Stárnutí organických materiálů: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně*.
- [7] Mentlík, V.: *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – technická literatura, Praha 2006.
- [8] Přikryl, T. *Dielektrické vlastnosti tepelně namáhaných drážkových izolací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsíválová.



## Seznam použitých zkratek a symbolů

|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
| $A$                  | [s]   | materiálová konstanta                  |
| $b$                  | [K]   | materiálová konstanta                  |
| $B$                  | [s]   | materiálová konstanta                  |
| $E_P$                | [V m <sup>-1</sup> ]                              | elektrická pevnost                     |
| $f$                  | [Hz]  | kmitočet                               |
| $h$                  | [m]   | tloušťka vzorku                        |
| $j$                  | [-]   | imaginární jednotka                    |
| $m$                  | [kg]  | hmotnost                               |
| $n$                  | [m <sup>-3</sup> ]                                | koncentrace nosičů elektrického náboje |
| $N$                  | [K <sup>-1</sup> ]                                | materiálová konstanta                  |
| $P$                  | [C m <sup>-2</sup> ]                              | vektor polarizace                      |
| $q$                  | [C]   | elektrický náboj                       |
| $t$                  | [s]   | doba života izolace                    |
| $T$                  | [K]   | absolutní teplota                      |
| $tg\delta$           | [-]   | ztrátový činitel                       |
| $\alpha$             | [-]   | koeficient rozložení relaxačních časů  |
| $\delta$             | [°]   | ztrátový úhel                          |
| $\varepsilon^*$      | [-]   | komplexní permitivita                  |
| $\varepsilon'$       | [-]   | relativní permitivita                  |
| $\varepsilon''$      | [-]   | ztrátové číslo                         |
| $\varepsilon_S$      | [-]   | statická permitivita                   |
| $\varepsilon_\infty$ | [-]   | optická permitivita                    |
| $\gamma_V$           | [S m <sup>-1</sup> ]                              | vnitřní konduktivita                   |
| $\vartheta$          | [°C]  | teplota                                |
| $\mu$                | [m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ] | driftová pohyblivost                   |
| $\rho_V$             | [Ω m]   | vnitřní rezistivita                    |
| $\rho_P$             | [Ω]   | povrchová rezistivita                  |
| $\tau$               | [s]   | relaxační doba                         |
| $\omega$             | [rad s <sup>-1</sup> ]                            | kruhový kmitočet                       |
| $\omega_m$           | [rad s <sup>-1</sup> ]                            | maximální kruhový kmitočet             |